Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 1, Mar.-Apr. 2024, p. 69-85

Investigation of the Effect of Biochar on the Physical and Chemical Properties of Soil under Quinoa Cultivation under Water and Salinity Stress Conditions

O. Tourajzadeh[1], H. Piri[2*], A. Naserin[3], M.M. Chari[2]

1 and 2- Ph.D. Graduate and Assosiat Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)
3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources, University of Khuzestan, Mollasani, Iran

Received: 10-08-2023 Revised: 18-12-2023 Accepted: 15-01-2024 Available Online: 15-01-2024	**How to cite this article:** Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & Chari, M.M. (2024). Investigation of the effect of biochar on the physical and chemical properties of soil under quinoa cultivation under water and salinity stress conditions. *Journal of Water and Soil, 38*(1), 69-85. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83859.1322

Introduction

Appropriate and practical use of agricultural waste reduce the pressure on the environment. Recently, there has been significant promotion of biochar utilization in agricultural lands. It serves as a valuable source of organic material for enhancing plant growth and as an effective soil amendment to improve soil properties. Due to its unique chemical and physical properties, biochar can be used as a soil conditioner and has many benefits for optimal agricultural and environmental management. Studies have shown that biochar is a useful amendment for improving the physical and chemical properties of soil and effective in maintaining organic matter and soil moisture.

Materials and Methods

This research was conducted with the aim of investigating the effects of biochar on the physical and chemical properties of soil under conditions of water stress and irrigation using saline water. The experiment was carried out in a factorial based on a completely randomized design with three replications in greenhouse conditions. The treatments include three irrigation water treatments (60, 80, and 100 percent water requirement of the plant, respectively, I1, I2, and I3), three treatments of biochar prepared from northern forest trees at a temperature of 300 degrees Celsius (0, 2, and 4 percent by weight of potting soil, respectively, B1, B2, and B3) and three water quality treatments (with electrical conductivity 1, 4 and 7 dS/m, respectively, S1, S2 and S3). The pots were weighed every other day and at each level of biochar and salinity, the water deficit up to the agricultural moisture level was calculated based on the changes in the pot's weight. After harvesting (in the first half of April 2022), in order to investigate the effect of biochar on the amount of soil nutrients and some physical and chemical parameters of the soil under the conditions of water stress and irrigation water salinity, sampling was done from the soil of each pot. The samples were taken to the laboratory and parameters of apparent and actual specific gravity, acidity and salinity of the soil, percentage of nitrogen, phosphorus and potassium absorbable of the soil were measured in the laboratory. Referring to the yield to irrigation water ratio, water productivity is obtained by the following relation (Payero et al., 2009): WP=Y/IR, where, WP represents water productivity (kg/m^3), Y denotes the yield (kg/ha), and IR shows the amount of irrigation water (m^3/ha). Analysis of variance for the results obtained from different

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83859.1322

treatments was conducted using SAS software (SAS 9.1, SAS Institute, Cary, NC, USA). The mean values of the main factors and interactive effects were compared using the Duncan method at the 1% and 5% levels of significance.

Results and Discussion

The results showed that the amount of biochar, irrigation water and water salinity and their mutual effects had a significant effect on the measured parameters at the probability level of one and five percent. Adding 2 and 4 mass percent biochar to the soil increased the amount of phosphorus (35 and 60%, respectively), potassium (57% and 61%), nitrogen (83% and 91%), pH (13% and 13%) and electrical conductivity (EC) (13% and 57%) of the soil. By adding 2% and 4% of biochar to the soil, the actual specific gravity of the soil decreased by 13% and 21%, respectively, and the apparent specific gravity decreased by 11% and 22%, respectively. The actual and apparent specific gravity of the soil decreased by adding biochar to the soil. Decreasing the depth of irrigation water and increasing water salinity increased the amount of phosphorus, potassium, nitrogen, pH and EC of the soil. The amount of irrigation water had no significant effect on the apparent and actual specific gravity, however, the salinity of the irrigation water caused a significant increase in the apparent and actual specific gravity of the soil. Although the addition of biochar to the soil increased the nutrients required by plants in the soil, high amounts of biochar in the soil should be used careful, because the addition of this organic matter to the soil at high levels increased soil EC significantly. Based on the findings derived from the research, the utilization of biochar is recommended as a viable approach for enhancing both the chemical quality and productivity of nutrient-poor and sandy soils.

Keywords: Apparent specific gravity, Electrical conductivity, Nitrogen, Phosphorus, Potassium

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۳، ص. ۸۵-۶۹

بررسی تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحت کشت کینوا در شرایط تنش آبی و شوری

ام البنین توراج‌زاده[1]- حلیمه پیری[2*]- امیر ناصرین[3]- محمد مهدی چاری[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

چکیده

استفاده مناسب و کاربردی از ضایعات کشاورزی موجب کاهش فشار بر محیط‌زیست خواهد شد. این پژوهش با هدف بررسی اثرات بیوچار در شرایط تنش آبی و شوری آب آبیاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد. آزمایش در شرایط گلخانه به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملا تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل آب آبیاری (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب، I_1، I_2 و I_3)، بیوچار تهیه شده از درختان جنگلی شمال در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (صفر، ۲ و ۴ درصد جرمی خاک گلدان به‌ترتیب B1، B2 و B3) و کیفیت آب (با قابلیت هدایت الکتریکی ۱، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب S1، S2 و S3) بود. گلدان‌ها به‌صورت یک روز در میان توزین شده و کمبود آب تا حد رطوبت زراعی براساس تغییرات جرم گلدان محاسبه شد. بعد از پایان فصل کشت کینوا (برداشت نیمه اول فروردین ۱۴۰۱)، برای بررسی اثر بیوچار بر میزان عناصر غذایی خاک و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شرایط تنش آبی و شوری آب آبیاری، نمونه‌برداری از خاک هر گلدان انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، pH و شوری خاک، درصد نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد مقدار بیوچار، آب آبیاری و شوری آب و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک و پنج درصد بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده تأثیر معنی‌داری داشت. افزودن ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار به خاک سبب افزایش مقدار فسفر (به‌ترتیب ۳۵ و۶۰ درصد)، پتاسیم (۵۷ و ۶۱ درصد)، نیتروژن (۸۳ و ۹۱ درصد)، pH (۱۳ و ۱۳ درصد) و قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) (۱۳ و ۵۷ درصد) شد. جرم مخصوص حقیقی خاک با افزودن ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار به خاک به‌ترتیب ۱۳ و ۲۱ درصد و جرم مخصوص ظاهری به‌ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد کاهش یافت. کاهش عمق آب آبیاری و افزایش شوری آب باعث افزایش مقدار فسفر، پتاسیم، نیتروژن، pH و EC خاک شد. مقدار آب آبیاری تأثیر معنی‌داری بر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی نداشت اما شوری آب آبیاری سبب افزایش معنی‌دار جرم خصوص ظاهری و حقیقی خاک شد. اگر چه افزایش بیوچار به خاک باعث افزایش عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در خاک شد اما با توجه به این‌که افزودن این ماده آلی به خاک در سطوح زیاد سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود لذا استفاده از مقادیر زیاد بیوچار در خاک باید با احتیاط انجام شود.

واژه‌های کلیدی: پتاسیم، جرم مخصوص ظاهری، فسفر، قابلیت هدایت الکتریکی، نیتروژن

مقدمه

با افزایش جمعیت جهان، نیاز به غذا و تولیدات کشاورزی به‌شدت در حال افزایش است به‌طوری که سازمان خوار و بار جهانی پیش‌بینی کرده است با افزایش جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰، سالانه ۲۰۰ میلیون تن غذا و محصولات کشاورزی مورد نیاز است (Bhupindar, 2014)، اما بر اثر عواملی همچون تغییرات آب و هوا، محدود شدن منابع آب و خاک و افزایش آلودگی محیط‌زیست مشکلاتی در کشاورزی و تولید مواد غذایی کافی به‌وجود می‌آید. در شرایط تنش خشکی و شوری، جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه محدود می‌شود (Waraich *et*

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)
۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان ملاثانی، اهواز، ایران

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.83859.1322

al., 2013). بنابراین در این شرایط خاک باید بستر مناسبی را برای تأمین نیازهای گیاه به عنوان محیط رشد و نمو فراهم کند. کاربرد کودهای آلی، زیستی و همچنین مواد معدنی طبیعی می‌تواند موجب اصلاح ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شوند (Dabhi et al., 2013). عدم مدیریت صحیح خاک موجب شده است تا خاک به تدریج کیفیت و حاصل‌خیزی خود را از دست داده و به خاک نامرغوب تبدیل شود. بنابراین استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی که بتواند این شرایط را بهبود بخشیده و از تخریب خاک جلوگیری کند، امری ضروری می‌باشد. مصرف صحیح و مناسب انواع اصلاح‌کننده‌ها مهمترین راه حفظ و اصلاح شرایط حاصل‌خیزی خاک و افزایش عملکرد محصولات کشاورزی می‌باشد (Karmaka et al., 2007). افزودن اصلاح‌کننده های آلی به خاک در شرایط کمبود آب بسیار مؤثر هستند (Hirich et al., 2013). اخیرا استفاده از بیوچار در زمین‌های کشاورزی به‌عنوان منبع تأمین کننده مواد آلی برای رشد گیاه و اصلاح کننده‌ای برای بهبود ویژگی‌های خاک رونق زیادی یافته است (Domene et al., 2014). بیوچار به‌دلیل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد خود، می‌تواند به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک مورد استفاده قرار گرفته و فواید بسیاری برای مدیریت بهینه کشاورزی و محیط‌زیست داشته باشد. بیوچار ماده جامد سیاه‌رنگ غنی از کربن پایدار می‌باشد که در نتیجه سوزاندن مواد آلی در شرایط بدون اکسیژن و یا اکسیژن کم، در دمای کمتر از 700 درجه سلسیوس تولید می‌شود (Lehmann & Joseph, 2009). مطالعات نشان داده است که بیوچار یک ماده اصلاح‌کننده مفید برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، مؤثر در حفظ ماده آلی و رطوبت خاک می‌باشد (Van Zwieten et al., 2013). بیوچار ویژگی–های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک توسط محققان مختلف طی دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده است که افزودن بیوچار به خاک کیفیت آن را تغییر می‌دهد و اغلب سبب افزایش و بهبود کیفیت خاک می‌شود (Lehmann & Joseph, 2009).

با توجه به پایداری بیوچار در مقابل تجزیه میکروبی و زمان ماندگاری طولانی آن در خاک، مصرف بیوچار سبب افزایش سطح مواد آلی خاک به‌مدت طولانی و در نتیجه بهبود ویژگی‌های خاک، مخصوصا در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود. همچنین، افزودن بیوچار به‌عنوان یک ماده اصلاحی به خاک موجب افزایش بازهای تبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت دسترسی عناصر غذایی، کاهش جرم مخصوص ظاهری و بهبود ظرفیت نگهداری آب می‌شود (Liang et al., 2006). بیوچار به‌دلیل سطح ویژه زیاد و تراکم بار سطحی بالا، توانایی خاک برای نگه‌داری عناصر غذایی و آب قابل استفاده گیاه را افزایش و شستشوی عناصر غذایی و کودها را کاهش می‌دهد (Laird et al., 2010). بیوچار با کاهش آبشویی عناصر غذایی، سبب افزایش بهبود بهره‌وری کودها شده و با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و کاهش مقاومت کششی خاک، موجب نفوذ و رشد بهتر ریشه گیاه می‌شود (Knowles et al., 2011). نجفی قیری (Najafi Ghairi, 2014) تأثیر کاربرد بیوچار را بر ویژگی‌های خاک و قابلیت جذب عناصر غذایی مورد بررسی قرار داد. نتایج پژوهش نشان داد مصرف بیوچار سبب افزایش معنی‌دار ماده آلی و قابلیت هدایت الکتریکی و پتاسیم محلول و تبادلی شد در حالی‌که قابلیت دسترسی نیتروژن، فسفر، روی و مس تحت تأثیر مصرف بیوچار قرار نگرفت. نتایج مطالعه دیوبند هفشجانی و همکاران (Deoband Hafeshjani et al., 2016) نشان داد افزودن بیوچار باگاس نیشکر تهیه شده در ۳۰۰ درجه سلسیوس و در سطوح ۰/۲، ۰/۵ و ۱ درصد جرمی، سبب افزایش معنی‌دار کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل جذب، ظرفیت تبادل آنیونی، قابلیت هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شد.

منطقه سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان یکی از مناطق مهم و استراتژیک استان است. کمبود آب در دشت سیستان، یک مسئله جدی و دارای اهمیت است. تنها منبع آب منطقه، رودخانه هیرمند است که از کوه‌های بابا یغمای افغانستان سرچشمه می‌گیرد و بحران آب منطقه، ناشی از کمبود آب در این رودخانه است به‌گونه‌ای که عدم تأمین آب هیرمند منجر به نابودی کشاورزی منطقه گردیده است. در این منطقه اراضی زیادی وجود دارد که قابل زرع می‌باشد اما به‌دلیل کمبود منابع آب به‌صورت بایر رها شده‌اند. بنابراین باید دنبال راهکاری بود که با حفظ شرایط پایدار در منابع آب و خاک منطقه از لحاظ اقتصادی موجب توسعه کشاورزی شود. تدوین برنامه آبیاری و اعمال مدیریت صحیح آبیاری در این منطقه می‌تواند از زیان‌های ناشی از کمبود منابع آب در منطقه بکاهد. برخی از کشاورزان منطقه برای آبیاری اراضی کشاورزی از چاهک‌های سطحی که در مزراع آن‌ها حفر شده است، استفاده می‌کنند. آب این چاهک‌ها معمولا از نظر کیفی نامطلوب و شور می‌باشد. استفاده از این آب‌ها سبب کاهش عملکرد گیاهان و در نهایت شوری خاک می‌شود. از طرف دیگر درصد ماده آلی و عناصر غذایی در خاک اراضی سیستان کم می‌باشد. استفاه از بیوچار به‌عنوان منبع تأمین کننده ماده آلی برای تأمین مواد غذایی گیاهان و همچنین اصلاح خاک در این منطقه می‌تواند مفید باشد. لذا هدف از این پژوهش بررسی و تعیین سطوح مناسب کاربرد بیوچار برای خاک‌های اراضی دشت سیستان در شرایط کم‌آبی و شوری آب آبیاری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه دشت سیستان بود. این منطقه در محدوده طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی واقع

شده است. این منطقه با اقلیم گرم و خشک دارای متوسط بارندگی سالیانه منطقه ۵۵ میلی‌متر و میزان تبخیر سالیانه ۴۵۰۰ تا ۵۰۰۰ میلی متر و ارتفاع از سطح دریا ۴۸۹/۲ متر می‌باشد. غالب بافت خاک منطقه لوم شن می‌باشد (Negaresh & Latifi, 2018). ابتدا، خاک با بافت لوم شنی از اعماق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک منطقه تهیه شده، هوا خشک شده و سپس از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد. همچنین از آب مورد استفاده نیز جهت تعیین کیفیت آن نمونه‌برداری شد. بیوچار مورد استفاده در تحقیق از شرکت کربن اکتیو بشل واقع در قائمشهر مازندران خریداری شد. شرکت مورد نظر برای تهیه بیوچار از شاخ و برگ خشک شده درختان جنگلی استان مازندران استفاده کرده است. ابتدا شاخ و برگ‌های خشک شده بسته‌بندی شده و سپس در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس و در شرایط بدون اکسیژن حرارت داده شده است. نتایج تجزیه آب و خاک و بیوچار مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. برای اندازه‌گیری pH و هدایت الکتریکی بیوچار از نسبت یک به ۱۰ بیوچار با آب مقطر استفاده شد (Guvili *et al*., 2016).

پژوهش در قالب طرح کاملا تصادفی و به روش فاکتوریل و به صورت گلدانی با سه تکرار در آبان ماه ۱۴۰۰ در گلخانه در شهر بنجار با موقعیت جغرافیایی ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و یک دقیقه عرض شمالی اجرا شد. فاکتورها شامل آب آبیاری در سه سطح (۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد مقدار آب آبیاری به‌ترتیب، I_1، I_2 و I_3)، سه سطح شوری آب آبیاری (۱، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب S_1، S_2 و S_3) و سه سطح بیوچار (۰، ۲ و ۴ درصد جرمی خاک گلدان به ترتیب B1، B2 و B3) بود. انتخاب سطوح شوری آب آبیاری براساس وجود چاهک‌های آب شور در منطقه مورد مطالعه بود که کشاورزان منطقه از آب این چاهک‌ها برای کشاورزی استفاده می‌کنند. مقادیر بیوچار نیز براساس مطالعات انجام شده توسط محققین در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است (Mir *et al*., 2021). گلدان‌های مورد استفاده در تحقیق گلدان پلاستیکی با قطر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بود. گلدان‌ها با ۵ کیلو خاک عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متری و سطوح مختلف بیوچار پر شد. ابتدا گلدان‌ها به‌صورت کامل اشباع شد. روی گلدان‌ها برای جلوگیری از تبخیر آب پوشانده شد. جرم گلدان بعد از زمانی که آب ثقلی از انتهای گلدان خارج شد، اندازه‌گیری و به‌عنوان جرم در حالت ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد (Mir *et al*., 2021). در هر گلدان تعداد هشت عدد بذر کینوا رقم Titicaca در نیمه دوم آبان ۱۴۰۰ در عمق ۲ سانتی‌متری از سطح خاک کاشته شد. پس از استقرار گیاه در مرحله چهاربرگی به سه گیاه در گلدان تقلیل یافت. از زمان کاشت تا زمان استقرار گیاهچه، تمام گلدان‌ها به‌صورت کامل و با آب شیرین و تا حد ظرفیت زراعی آبیاری شد. سپس تیمارهای شوری و کم‌آبیاری اعمال شد. گلدان‌ها به‌صورت یک روز در میان توزین شده و در هر سطح بیوچار و شوری، کمبود آب تا حد رطوبت براساس تغییرات جرم گلدان محاسبه شد و سپس براساس سطح تیمار آبیاری، آبیاری انجام شد.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، آب و بیوچار
Table 1- Some physical and chemical characteristics of soil, water and biochar

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده Measured characteristics	روش اندازه‌گیری Measured method	بیوچار Biochar	آب Water S3	S2	S1	خاک Soil
pH	عصاره گیری گل اشباع و pH متر و EC سنج Saturated paste extraction and, pH and EC meter	7.3	7.12	7.42	7.81	8.30
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)		6.1	7	4	1	0.6
کربن آلی Organic carbon (%)	به روش والکی بلک (۱۹۳۴) Walkly Black (1934) method	57.50	-	-	-	1.36
فسفر Phosphorus (mg/kg)	به روش اولسن (اولسن و سومر، ۱۹۹۰) Olsen method (Olsen and Sommer, 1990)	398.65	0.39	0.34	0.26	10.45
پتاسیم Potassium (mg/kg)	عصاره گیری گل اشباع و روش وستمن (۱۹۹۰) Saturated paste extraction and Westman method (1990)	2375.48	0.74	0.65	0.41	110.63
کلسیم محلول Dissolved calcium (meq/L)	عصاره گیری گل اشباع و دستگاه فلیم فتومتر (پیج، ۱۹۸۲) Saturated paste extraction and flame photometer spectroscopy (Page, 1982)	17.5	14.64	8.25	2.05	0.42
منیزیم محلول Dissolved magnesium (meq/L)		11.60	10.16	5.74	2.95	0.75
سدیم محلول Dissolved sodium (meq/L)		3.70	18.95	9.87	4.20	0.63
نیتروژن Nitrogen (%)	به روش کجلدال (برمنر، ۱۹۹۶) Kjeldahl method (Bremner, 1996)	19.50	-	-	-	0.02

بعد از پایان فصل کشت (برداشت نیمه اول فروردین ۱۴۰۱)، برای بررسی اثر بیوچار بر میزان عناصر غذایی قابل جذب خاک و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در شرایط تنش آبی و شوری آب آبیاری، نمونه‌برداری از خاک هر گلدان انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شد. ویژگی‌های جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، اسیدیته و شوری خاک، درصد نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک در آزمایشگاه اندازه گیری شد. فسفر قابل جذب خاک به روش اولسن (Olsen & Sommers, 1990) و پتاسیم قابل استفاده بوسیله استات آمونیوم عصاره‌گیری شد (Westeman, 1990). غلظت فسفر و پتاسیم به‌ترتیب توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و فلیم فتومتر تعیین شد. درصد نیتروژن کل به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (Bremner, 1996). تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. با توجه به این که تحقیق حاضر بعد از کشت کینوا بوده است برای بررسی بهتر نتایج، تأثیر تیمارها بر عملکرد کینوا نیز در جداول ۲ تا ۶ آورده شده است.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اثر مقدار آب آبیاری، شوری و بیوچار و اثرات متقابل آن‌ها بر ویژگی‌ها در سطح احتمال یک و یا پنج درصد معنی‌دار بوده است. جداول ۳ تا ۶ مقایسه میانگین اثرات ساده و متقابل ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می دهند. بیوچار ویژگی‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تأثیر بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک توسط محققان مختلف طی دهه گذشته مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده که افزودن بیوچار به خاک کیفیت آن را تغییر می‌دهد و اغلب بهبود کیفیت خاک را به همراه دارد (Lehmann & Joseph, 2009).

عملکرد: مطابق جدول ۳ کاهش عمق آب آبیاری باعث کاهش ۱۱/۹ و ۲۸/۹۶ درصدی عملکرد دانه شد اما این کاهش بین تیمار I3 و I2 معنی‌دار نبود. افزایش تنش آبی منجر به کوچک شدن سطح برگ، کاهش شاخص سطح برگ، کاهش وزن سنبله و کوچک شدن دانه و به‌دنبال آن کاهش عملکرد دانه شد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) ویژگی‌های خاک و عملکرد محصول

Table 2- Results of analysis of variance (mean square and degree of freedom) of soil property and crop yield

منابع تغییرات MS	درجه آزادی DF	جرم مخصوص ظاهری Bulk density	جرم مخصوص حقیقی Actual density	اسیدیته pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC	نیتروژن Nitrogen	پتاسیم Potassium	فسفر Phosphorus	عملکرد Yield
بیوچار (B) Biochar	2	0.002*	0.106*	0.056**	39.69**	0.005**	6345.52**	8.42**	1151.43**
مقدار آب آبیاری Amount of water (I) irrigation	2	0.000 ns	0.828 ns	0.02*	11.98*	0.002*	5716.69**	11.35*	291.82**
شوری آب آبیاری Salinity of irrigation Water (S)	2	0.003*	1.187*	0.002*	27.179**	0.004**	3825.32**	10.26*	625.84**
I*B	4	0.014ns	3.226ns	0.03*	4.466*	0.003*	3196.27*	9.78*	48.14*
I*S	4	0.002*	0.589*	0.013*	1.751*	0.006**	2873.49*	5.62*	16.42*
B*S	4	0.004*	1.153*	0.018*	11.078*	0.003**	2597.55*	8.54*	85.29**
I*B*S	8	0.002 ns	2.194 ns	0.023*	23.543**	0.002*	2358.41*	6.39*	124.69**
خطا Error	12	0.003	0.965	0.008	5.136	0.001	19.41	1.32	12.18
ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)	-	10.549	22.668	1.280	19.283	20.510	14.26	16.27	

*و **معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

* and ** significance at the probability level of five percent and one percent, ns non-significance.

گزارشات مختلف بیانگر کاهش عملکرد دانه با افزایش تنش خشکی می‌باشد (Telahigue *et al.*, 2017; Elewa *et al.*, 2017). اولین نشانه تنش خشکی در گیاهان کاهش فشار تورگور و در ادامه کاهش رشد سلول‌ها می‌باشد. کاهش رشد سلول منجر به کاهش ارتفاع گیاه و کاهش تولید ماده خشک می‌شود. با کاهش رشد سلول، رشد برگ، میزان جذب نور خورشید، فتوسنتز و تولید ماده خشک کاهش می‌یابد (Mohkami *et al.*, 2022). کاربرد ۲ درصد وزنی بیوچار عملکرد دانه را افزایش داد. استفاده بیشتر بیوچار (تیمار B3) عملکرد دانه را افزایش داد اما با تیمار عدم مصرف بیوچار تأثیر معنی‌دار نداشت که به‌دلیل افزایش شوری حاصل از کاربرد مقادیر زیاد بیوچار می‌باشد. نتایج بررسی تأثیر بیوچار بر شوری خاک که در ادامه به آن پرداخته شده است، مؤید این موضوع است. سان و همکاران (Sun *et al.*, 2019) هفت سطح بیوچار را بر روی گیاه گندم مورد ارزیابی قرار دادند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد کاربرد ۵ تا ۲۰ تن در هکتار بیوچار باعث افزایش عملکرد گندم شد اما کاربرد بیشتر از آن موجب کاهش عملکرد گندم شد (Sun *et al.*,2019). محققین بیان داشتند افزایش عملکرد در اثر کاربرد بیوچار در خاک می‌تواند به‌دلیل اثرات مستقیم (عناصر غذایی موجود در زیست‌توده که طی فرایند تجزیه حرارتی به بیوچار تبدیل شده) و غیرمستقیم (بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک) آن باشد (Major *et al.*, 2010). تیمار B2 با ۱۳۸۶/۴۵ کیلوگرم در هکتار بیشترین و تیمار B1 با ۹۶۷/۸۶ کیلوگرم در هکتار کمترین مقادیر عملکرد دانه را داشتند. جرم مخصوص ظاهری کم، تخلخل زیاد، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و ظرفیت نگهداری رطوبت قابل ملاحظه‌ی بیوچار باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و حاصلخیزی خاک، افزایش رشد گیاه و عملکرد می‌شود (Fathi & Mirseyed, 2015). محکمی و همکاران (Mohkami *et al.*, 2022) به نتایج مشابهی دست یافتند و بیان کردند استفاده از بیوچار باعث افزایش عملکرد کینوا در شرایط تنش خشکی شد. شوری آب آبیاری باعث کاهش معنی‌دار مقدار عملکرد دانه شد (جدول ۳). آب با کیفیت ۴ دسی‌زیمنس بر متر (تیمار S2) منجر به کاهش ۱۴/۱ درصدی عملکرد دانه شد اما با تیمار S1 تفاوت معنی‌دار نداشت. بنابراین می‌توان گفت کینوا از نظر تحمل شوری آب آبیاری گیاهی نسبتا مقاوم می‌باشد. تنش شوری باعث افزایش فشار اسمزی، اختلال در جذب آب توسط ریشه، کاهش فتوسنتز گیاه، کاهش مواد فتوسنتزی و در نتیجه کاهش عملکرد دانه می‌شود. القصیبی و همکاران (Algosiabi *et al.*, 2015) نشان دادند در شوری های بالای ۴ دسی‌زیمنس بر متر عملکر دانه کینوا کاهش یافت. اثرات متقابل آب آبیاری و بیوچار (جدول ۴) نشان داد در تمام سطوح آب آبیاری با افزایش مصرف بیوچار تا ۲ درصد وزنی عملکرد دانه افزایش یافت. افزایش بیشتر بیوچار (تیمار ۴ درصد وزنی) باعث کاهش عملکرد دانه شد. در سطوح تنش آبی شدید تیمار عدم مصرف بیوچار (B1) عملکرد دانه بیشتری نسبت به تیمار ۴ درصد وزنی بیوچار (B3) داشت.

تیمار I1B3 کمترین (۵۴۰/۱۲ کیلوگرم در هکتار) مقدار عملکرد دانه را داشت. می‌توان بیان داشت استفاده از بیوچار با به‌کار بردن آب آبیاری مناسب، باعث فراهم شدن آب و مواد غذایی و درنتیجه رشد بهینه گیاه گردیده است. ابراهیم و همکاران (Ibrahim *et al.*, 2015) به افزایش بیشتر عملکرد کاه و کلش در تیمارهای حاوی بیوچار و آبیاری براساس ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه در مقایسه با تیمارهای بدون بیوچار و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه اشاره کردند که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. در تحقیق حاضر نیز عملکرد دانه (۱۱۸۶/۶۱ کیلوگرم در هکتار) در تیمار I2B2 (۸۰ درصد نیاز آبی گیاه و استفاده ۲ درصد وزنی بیوچار) بیشتر از عملکرد دانه (۹۸۶/۲۷ کیلوگرم در هکتار) در تیمار I3B1 (۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و عدم استفاده از بیوچار) بود. اثر متقابل آب آبیاری و شوری (جدول ۶) نشان داد با افزایش شوری آب آبیاری و کاهش عمق آب مصرفی عملکرد دانه کاهش یافت. بیشترین عملکرد دانه (۱۳۳۴/۵۷ کیلوگرم در هکتار) از تیمار I3S1 مشاهده شد. تیمار I2S1 با مقدار ۱۳۲۶/۸۵ کیلوگرم در هکتار در رتبه بعدی قرار گرفت که تفاوت معنی‌دار با تیمار I3S1 نداشت. در تنش‌های آبی بالا استفاده از آب با کیفیت پایین باعث کاهش شدیدتر عملکرد شد. یکی از دلایل کاهش عملکرد را می‌توان به کاهش فتوسنتز در نتیجه‌ی تنش حاصل از تجمع نمک در محدوده ریشه نسبت داد که این مسأله می‌تواند در نتیجه کاهش ورود دی‌اکسیدکربن به‌دلیل کاهش هدایت روزنه و همچنین کاهش سطح برگ باشد (Netondo *et al.*, 2004). از سوی دیگر، افزایش پتانسیل اسمزی در نتیجه‌ی حضور نمک در محدوده ریشه و کاهش آن در سلول‌های گیاهی، موجب تغییر در مسیر انتقال فرآورده های فتوسنتزی و تجمع آن در سلول‌های ریشه برای مقابله با تنش حاصله خواهد شد. به‌عبارت دیگر، کاهش انرژی آزاد آب در خاک گیاه را وادار خواهد کرد تا برای جذب آب انرژی بیشتری صرف کند که این امر مستلزم افزایش پتانسیل اسمزی در سلول‌های گیاهی با تجمع مواد قندی در آن است. تجمع مواد آلی ساخته شده در سلول‌های ریشه به منظور تنظیم اسمزی و مقابله با اثرات مخرب شوری در جذب آب، انتقال آن به سایر اندام‌های هوایی و متعاقباً رشد رویشی را محدود ساخته و در نهایت منتج به کاهش عملکرد خواهد شد (Piri *et al.*, 2022). اثر متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد با کاربرد آب شور (تیمار S2 و S3) و افزایش بیوچار مصرفی عملکرد دانه کاهش یافت. تیمار B2S1 (آب غیرشور و ۲ درصد وزنی بیوچار) عملکرد دانه (۱۳۰۲/۵۳ کیلوگرم در هکتار) بالاتری نسبت به تیمار B1S1 (آب غیرشور و عدم مصرف بیوچار) داشت. بنابراین می‌توان گفت در شرایط استفاده از آب شیرین بیوچار می‌تواند عملکرد دانه را افزایش دهد. در شرایط استفاده از آب شور با شوری S2 و S3 عملکرد دانه در تیمارهای عدم استفاده بیوچار (تیمارهای B1S2 و B1S3) بیشتر از تیمار ۲ و ۴ درصد وزنی بیوچار بود اما از این نظر با عملکرد دانه تیمارهایی که ۲ درصد وزنی بیوچار داشتند (تیمارهای B2S2 و B2S3) تفاوت معنی‌دار

نداشت.

فسفر: مطابق جدول ۳ اثرات مقدار بیوچار بر قابلیت استفاده فسفر در خاک در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. با کاربرد بیوچار مقدار فسفر قابل جذب افزایش یافت. بیشترین مقدار فسفر (۲۴/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در تیمار مصرف ۴ درصد جرمی بیوچار به‌دست آمد. مصرف ۲ درصد جرمی بیوچار با مصرف ۴ درصد جرمی تفاوت معنی‌دار با هم نداشتند. افزایش فسفر قابل جذب در تیمارهای حاوی بیوچار می‌تواند به‌دلیل تجزیه بیوچار و تشکیل کمپلکس‌های آلی قویتری با کلسیم، آهن و آلومینیوم در مقایسه با فسفر ایجاد کنند و موجب کاهش سرعت رسوب فسفر تغییر شکل آن شوند. به‌علاوه، ایجاد پوشش محافظ در سطح ذرات توسط هوموس ظرفیت تثبیت فسفر این ذرات را کاهش می‌دهد (Kang *et al.*, 2008). بیوچار می‌تواند قابلیت استفاده فسفر را از طریق جذب سطحی و افزایش ظرفیت تبادل آنیونی خاک، افزایش دهد (Chintala *et al.*, 2014) و از طرفی بیوچار به دلیل اندوخته زیاد فسفر، به‌طور مستقیم نیز فسفر آزاد می‌کند و سبب افزایش فسفر خاک می‌شود (Zahoor *et al.*, 2017). شیرمردی و توفیقی (Shirmardi & Tofighi, 2014) بیان کردند افزودن ماده آلی به خاک موجب افزایش بازیابی فسفر اضافه شده به خاک می‌شود. حسن پور و همکاران (Hasanpour *et al.*, 2022) بیان کردند اضافه کردن بیوچـار در خاک‌های لـوم‌شـنی سبب افزایش معنی‌دار فسفر قابل جذب خاک نسبت به تیمار شاهد شد که به‌دلیل وجود ذخیره فسفر در بیوچار کاربردی است. فروهر و همکاران (Forohar *et al.*, 2017) در تحقیق خود بیان داشتند استفاده از بیوچار کود گاوی در خاک‌های آهکی مقدار فسفر خاک را از ۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به مقدار ۴۰/۷ میلی-گرم در کیلوگرم خاک افزایش داد و علت آن را بالابودن مقدار فسفر موجود در بیوچار کود گاوی (۸۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بیان کردند. ثقفی و همکاران (Thaghafi *et al.*, 2021) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که افزودن بیوچار خرما به خاک شور بر مقدار فسفر خاک تأثیر معنی‌دار نداشت که با نتایج این تحقیق و تحقیقات قبلی که افزایش فسفر خاک را گزارش کردند (He *et al.*, 2017; Lou *et al.*, 2018)، مطابقت نداشت. ایشان بیان کردند احتمالاً این اختلاف نتیجهٔ نوع بیوچار متفاوتی است کـه در پژوهش اسـتفاده شـده اسـت. همچنین محتوای فسفر بیوچار مورد استفاده در تحقیق کمتر از مقدار فسفر خاک شاهد بود و بنابراین نمی‌توانسته است مقـدار فسـفر خـاک را افـزایش دهـد. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2015) در پژوهش خود نشان دادند که افزودن بیوچار کاه و کلش برنج در سطح ۵ درصد منجر به افزایش معنی‌دار و ۱۳/۸ درصدی فسفر قابل استفاده نسبت به تیمار بدون بیوچار شد. مطالعات نشان داده است افزودن اصلاح‌کننده های آلی به خاک مانند بیوچار سبب افزایش عناصر غذایی خاک، بهبود حاصلخیزی و افزایش تولید محصولات می‌شود (Zhang *et al.*, 2015). با افزایش سطوح خشکی از تنش ملایم به شدید مقدار فسفر قابل جذب خاک افزایش یافت. با افزایش عمق آب آبیاری از ۶۰ درصد (تیمار I1) به ۱۰۰ درصد (تیمار I3) مقدار فسفر ۱۸/۴۳ درصد کاهش یافت. بین تیمارهای ۶۰ و ۸۰ درصد آب آبیاری (I2 و I1) از نظر مقدار فسفر تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. آب آبیاری باعث شستشوی مواد غذایی و کودها وکاهش مقدار فسفر شد. مطابق جدول ۳ با افزایش شوری مقدار فسفر افزایش یافت. تیمار آب با کیفیت ۷ دسی‌زیمنس بر متر (تیمار S3) بیشترین مقدار فسفر (۲۴/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) را داشت. دلیل آن را می‌توان زیادتر بودن نسبت عناصر موجود در آب شور دانست. اثر متقابل آب آبیاری و بیوچار (جدول ۴) نشان داد با افزایش مقدار بیوچار کاربردی و کاهش عمق آب آبیاری مقدار فسفر افزایش یافت. مطابق جدول ۴ در هر کدام از سطوح آب آبیاری تیمارهایی که بیوچار در آن‌ها به‌کار رفته بود، مقادیر فسفر بیشتری داشتند. به‌عنوان نمونه مقدار فسفر (۲۱/۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و کاربرد ۴ درصد جرمی بیوچار (تیمار I3B3) بیشتر از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و عدم مصرف بیوچار (تیمار I3B1)(۱۷/۵۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) بود. کودهای آلی با افزایش قدرت نگهداری آب مانع شستشوی عناصر غذایی از خاک می‌شوند و در نتیجه ماندگاری عناصر غذایی در خاک افزایش می‌یابد، همچنین مواد آلی با افزایش فعالیت میکروبی سبب افزایش حلالیت عناصری مانند فسفر در خاک می‌شوند (Agegnehu *et al.*, 2016). یائو و همکاران (Yao *et al.*, 2009) نشان دادند با افزودن بیوچار تولید شده از کود حیوانی به خاک فروسول، فسفر قابل جذب گیاه در خاک افزایش یافت. اثر متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد با افزایش شوری آب آبیاری و بیوچار مصرفی مقدار فسفر افزایش یافت. بیشترین مقدار فسفر (۲۴/۹۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) از تیمار A3C3 (۴ درصد جرمی بیوچار و شوری ۷ دسی‌زیمنس بر متر) به‌دست آمد که با تیمار A2C3 (۲ درصد جرمی بیوچار و شوری ۷ دسی‌زیمنس بر متر) تفاوت معنی‌دار نداشت. اثر متقابل آب آبیاری و شوری (جدول ۶) نشان داد در هر یک از سطوح شوری آب آبیاری با کاهش عمق آب آبیاری مقدار فسفر افزایش یافت. دلیل این موضوع را می‌توان شستشوی مواد غذایی خاک در اثر کاربرد سطوح زیادتر آب دانست. بیشترین مقدار فسفر (۲۴/۶۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) از تیمار B1C3 (۶۰ درصد آب آبیاری و ۷ دسی‌زیمنس بر متر شوری آب) به دست آمد که با تیمار B2C3 تفاوت معنی‌دار نداشت.

پتاسیم: مطابق جدول ۲ اثرات آب آبیاری، بیوچار و شوری آب آبیاری و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک و پنج درصد بر مقدار پتاسیم خاک تأثیر معنی‌دار داشت. با افزایش بیوچار مصرفی مقدار پتاسیم افزایش یافت. افزودن ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار به خاک به ترتیب سبب افزایش ۶۸/۹۲ و ۷۷/۹۹ درصد پتاسیم نسبت به تیمار شاهد (عدم کاربرد بیوچار) شد. تفاوت معنی‌داری بین مقدار پتاسیم در تیمار ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار مشاهده نشد. با کاربرد بیوچار در خاک،

پتاسیم موجود در آن وارد فاز محلول و به دلیل تعادل بین پتاسیم محلول و تبادلی مقداری نیز وارد از تبادلی می‌شود و در نتیجه هر دو شکل محلول و تبادلی پتاسیم افزایش می‌یابد (Rahimi-Alashti *et al.*, 2021). ابریشمکش و همکاران (Abrishamkesh *et al.*, 2015) بیان کردند بیوچار شلتوک برنج اضافه شده با خاک با بافت لوم رسی، سبب افزایش پتاسیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد شد. فروهر و همکاران (Forohar *et al.*, 2017) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند کاربرد بیوچار کود گاوی در خاک آهکی مقدار پتاسیم خاک را از ۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به ۳۹۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک افزایش داد. ایشان بیان داشتند این امر می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر بیوچار کود گاوی بر فرایندهای جذب و رهاسازی پتاسیم و هدایت این واکنش ها به سمت رهاسازی بیشتر پتاسیم از منابع خاکی آن باشد. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2018) در پژوهش خود نشان دادند که مصرف بیوچار در خاک سبب افزایش رشد باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم در خاک شده و میزان پتاسیم قابل جذب در خاک را افزایش می‌دهد. در مطالعه دیگر ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2020) به این نتیجه رسیدند که با کاربرد دو درصد بیوچار، میزان مصرف کود پتاسه به اندازه ۴۰ درصد کاهش یافته است زیرا بیوچار با تغییر ساختار کانی‌های رسی و افزایش جمعیت میکروبی خاک، تبدیل پتاسیم کندرها را به پتاسیم قابل دسترس تسریع می‌بخشد (Zhang *et al.*, 2020). وجود مقدار زیادی پتاسیم در بیوچار آن را به‌عنوان یک منبع پتاسیم آلی خیلی مفید برای گیاه معرفی کرده که می‌تواند رشد و عملکرد گیاه را افزایش دهد (Gopal *et al.*, 2020). پتاسیم یکی ازعناصر پرمصرف گیاهی است و کمبود آن در خاک‌های ایران رو به گسترش است (Najafi-Ghiri *et al.*, 2011). بیوچار می‌تواند به‌عنوان ماده اصلاح‌کننده برای بهبود وضعیت حاصل‌خیزی پتاسیم خاک‌ها، مورد استفاده قرار گیرد. موخرجی و همکاران (Mukherjee *et al.*, 2013) بیان داشتند که بیوچار دارای دامنه‌ای از شکل‌های عناصر غذایی می‌باشد که با سرعت‌های متفاوتی آزاد شده و تأثیرات متفاوتی را بر حاصلخیزی خاک دارند. پژوهشگران گزارش کردند بیوچار حاصل از سبوس برنج می‌تواند میزان پتاسیم قابل تبادل خاک را افزایش دهد (Mensah *et al.*, 2018). نجفی‌قیری و همکاران (Najafi-Ghiri *et al.*, 2011) نیز در پژوهشی دریافتند که کاربرد بقایای گیاهی و بیوچار آنها می‌تواند علاوه بر افزایش مقدار ماده آلی خاک، وضعیت پتاسیم خاک را بهبود بخشد. ایشان بیان کردند که کاربرد برگ آتریپلکس، برگ کنار و بقایای نی و بیوچار آن‌ها تأثیر زیادی بر پتاسیم خاک داشته و مقدار همه شکل‌های پتاسیم را افزایش می‌دهد. ثقفی و همکاران (Thaghafi *et al.*, 2021) در تحقیق خود به این نتیجه دست یافتند که افزودن ۱/۵ و ۲ درصد وزنی بیوچار خرما به خاک شور موجب افزایش به‌ترتیب ۱۲/۳۳و ۱۸/۷۹ درصدی پتاسیم خاک نسبت به تیمار شاهد شد. ایشان بیان داشتند تفاوت در روند افزایش پتاسیم در سطوح مختلف بیوچار احتمالاً مربوط بـه تثبیت پتاسیم در سطوح پایین کاربرد بیوچار و کاهش یافتن میزان تثبیت در سطوح با نظیر ٪۲ باشد. به بیان ساده‌تر، در سطوح پایین کاربرد بیوچار، اکثر پتاسیم آزادشده از بیوچار بـه درون خاک وارد فازهایی غیر از محلول شده (فازهایی از قبیل تبادلی و حتی تثبیت در فضای بین لایه‌ای رس‌ها) و در نتیجه افزایش پتاسیم محلول کمتر نمود داشته است. اما در سطوح بالای کاربرد بیوچار احتمالاً با کاهش میزان تثبیت پتاسیم، بیشتر پتاسیم محلول خاک را متأثر کرده و در نتیجه افزایش‌های قابل توجهی در سطوح بالای کاربرد بیوچار مشاهده شد. افزایش عمق آب آبیاری به‌دلیل شستشوی مواد غذایی سبب کاهش مقدار پتاسیم خاک شد. بیشترین مقدار پتاسیم (۱۷۵/۳۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) از تیمار ۶۰ درصد آب آبیاری مشاهده شد که با تیمار ۸۰ درصد آب آبیاری تفاوت معنی‌دار نداشت. با افزایش رطوبت، گیاه میزان پتاسیم زیادی جذب کرده و به این دلیل خاک میزان پتاسیم کمتری را نشان داده است. این مطلب با نتایج حسینی و همکاران که گزارش نمودند با افزایش رشد و توسعه ریشه گیاه، میزان جذب پتاسیم به وسیله گیاه افزایش می‌یابد که در نتیجه میزان پتاسیم قابل جذب در خاک کاهش می‌یابد، مطابقت دارد (Hosseini *et al.*, 2015). افزایش شوری آب آبیاری نیز سبب افزایش مقدار پتاسیم شد. اثرات متقابل بیوچار و آب آبیاری (جدول ۴) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش بیوچار مصرفی مقدار پتاسیم افزایش یافت. بیشترین مقدار پتاسیم (۲۱۸/۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) از تیمار B3I1 و کمترین آن (۱۲۸/۹۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) از تیمار B1I3 به‌دست آمد. ساختار متخلل بیوچار سبب سطح ویژه زیاد آن و در خاک سبب افزایش ظرفیت نگهداری مواد مغذی خاک می‌گردد. علاوه بر این بیوچار، ظرفیت ماندگاری مواد مغذی را در خاک بهبود می‌بخشد و از آبشوئی آن‌ها در محیط خاک جلوگیری می‌کند. این موضوع می‌تواند به دو دلیل باشد؛ اول این‌که مواد مغذی در منافذ کربنی شده به دام می‌افتد و دوم این که اکسیداسیون زیستی آهسته سبب تولید گروه‌های کربوکسیل در حاشیه بیوچار می‌شود که ظرفیت نگهداری مواد مغذی را افزایش می‌دهد (Robbiani, 2013). تغییرات و پایداری بیوچار در خاک، تحت تأثیر وضعیت رطوبت خاک قرار می گیرد و وضعیت رطوبت خاک ممکن است معدنی شدن و تصاعد کربن بیوچار را در شرایط مختلف خاک تحت تأثیر قرار دهد که در این رابطه نیاز به پژوهش‌های بیشتری می‌باشد (Cheng *et al.*, 2008). اثرات متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد با افزایش شوری و افزایش بیوچار مصرفی مقدار پتاسیم افزایش یافت. در تمامی سطوح شوری تفاوت معنی‌داری بین مقادیر پتاسیم با کاربرد ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار مشاهده نشد. بیوچار اثرات تنش شوری را با جذب سدیم از محلول خاک کاهش می‌دهد (Akhtar *et al.*, 2015). پژوهش‌ها نشان داده است سدیم و پتاسیم با یکدیگر حالت رقابتی دارند. بیوچار سبب کاهش جذب سدیم و افزایش پتاسیم شده و مقاومت به شوری را

افزایش می‌دهد (Rajabi *et al.*, 2017). اثرات متقابل آب آبیاری و شوری (جدول ۶) نشان داد با افزایش شوری و کاهش عمق آب آبیاری مقدار پتاسیم افزایش یافت. با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش شوری، جذب آب توسط گیاه به‌دلیل کاهش رطوبت خاک و افزایش شوری آن، کاهش می‌یابد. بنابراین جذب پتاسیم توسط گیاه نیز کاهش می‌یابد و پتاسیم بیشتری در خاک باقی می‌ماند.

درصد نیتروژن: مقدار بیوچار، آب آبیاری و شوری آب و اثرات متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر مقدار درصد نیتروژن خاک داشت. با افزودن بیوچار به خاک مقدار نیتروژن خاک افزایش یافت. افزایش نیتروژن خاک می‌تواند به‌دلیل وجود نیتروژن در بیوچار باشد. حسن‌پور و همکاران (Hasanpour *et al.*, 2022) در بررسی تأثیر بیوچار بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و قابلیت جذب عناصر غذایی خاک در منطقه اصفهان به این نتیجه رسیدند که نیتروژن موجود در بیوچار در خاک آزاد شده و موجب افزایش نیتروژن خاک می‌شود. موخرجی و همکاران (Mukhrejee *et al.*, 2013) بیان داشتند اضافه کردند. بیوچار چمن به خاک با بافت شنی و لوم رسی موجب آزاد شدن نیتروژن در خاک و افزایش نیتروژن خاک می‌شود. همچنین نلیسن و همکاران (Nelisen *et al.*, 2012) با افزودن بیوچار ذرت به خاک به نتایج مشابهی دست یافتند. افزایش عمق آب آبیاری سبب کاهش مقدار نیتروژن خاک شد. بیشترین مقدار نیتروژن (۰/۲۶ درصد) در تیمار ۶۰ درصد عمق آب آبیاری به دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۸۰ درصد نداشت. شوری آب آبیاری نیز سبب افزایش درصد نیتروژن خاک شد. اثر متقابل آب آبیاری و بیوچار بر مقدار نیتروژن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در تمامی سطوح آب آبیاری افزودن بیوچار به خاک سبب افزایش درصد نیتروژن خاک شد. اثر متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد افزایش شوری آب و افزودن بیوچار سبب افزایش درصد نیتروژن خاک شد. بیشترین درصد نیتروژن (۰/۲۴ درصد) از تیمار B3S3 مشاهده شد که با تیمار B2S3 تفاوت معنی‌دار نداشت. افزایش نیتروژن خاک به دلیل زیاد بودن نیتروژن بیوچار می‌باشد که با اختلاط در خاک سبب افزایش نیتروژن خاک شد. اثر متقابل شوری و مقدار آب آبیاری (جدول ۶) نشان داد با افزایش شوری و کاهش عمق آب آبیاری درصد نیتروژن خاک افزایش یافت.

pH: مطابق جدول ۳ مقدار بیوچار، آب آبیاری و شوری آب و اثرات متقابل آن‌ها بر مقدار pH خاک تأثیر معنی‌داری داشت. pH خاک با افزایش بیوچار افزایش یافت. کاربرد ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار به‌ترتیب سبب افزایش ۱۳/۲۸ و ۱۳/۸۹ درصدی pH خاک شد. بیوچار به‌دلیل داشتن عناصر قلیایی مانند کلسیم و منیزیم دارای pH خنثی تا قلیایی می‌باشد. pH بیوچار بسته به نوع ماده آلی و شرایط گرماکافت آن از ۴ تا ۱۲ تغییر می‌کند. بیوچارهای با منشأ چوبی نسبت به بیوچارهای علفی pH کمتری دارند. بیوچارهای علفی به‌دلیل داشتن عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم بیشتر دارای pH زیادتری می‌باشند (Sing *et al.*, 2010). بنابراین می‌توان گفت اضافه کردن بیوچار با pH زیاد، سبب افزایش pH خاک می‌شود. چینتالا و همکاران (Chintala *et al.*, 2013) در پژوهش خود مشاهده کردند که افزودن بیوچار تولید شده از علوفه ذرت به خاک اسیدی، سبب افزایش pH خاک شد. زلفی باوریانی و همکاران (Zolfi Bavariani *et al.*, 2015) نشان دادند افزودن بیوچارکود مرغی باعث افزایش معنی‌دار pH، قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی خاک، پتاسیم و فسفر قابل دسترس شد و بیشترین میزان عناصر قابل جذب در بیوچار تهیه شده در ۳۰۰ درجه سلسیوس مشاهده شد. با توجه به این‌که خاک‌های منطقه سیستان آهکی و قلیایی می‌باشد و بیوچار سبب افزایش pH خاک می‌شود بنابراین استفاده از بیوچار در این مناطق دارای محدودیت است. افزایش عمق آب آبیاری سبب کاهش pH خاک شد. اما از این نظر تفاوت معنی‌داری بین تیمارها حاصل نشد. افزایش شوری آب آبیاری سبب افزایش pH خاک شد. احتمالا افزایش املاح ناشی از افزایش شوری آب آبیاری سبب افزایش pH خاک شد. اثر متقابل بیوچار و مقدار آب آبیاری (جدول ۴) نشان داد در تمام سطوح آبیاری افزودن بیوچار به خاک سبب افزایش pH خاک شد. تیمار B3I1 با ۹/۳۶ بیشترین و تیمار B1I3 با مقدار ۷/۶۸ کمترین مقادیر pH خاک را داشتند. اثرات متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد با افزایش شوری آب آبیاری و افزودن بیوچار به خاک مقدار pH خاک افزایش یافت. بیشترین مقدار pH خاک (۹/۹۴) از تیمار B3S3 و کمترین آن (۸/۱۱) از تیمار B1S1 به‌دست آمد. دلیل این امر افزایش املاح خاک در اثر استفاده از بیوچار و آب شور می‌باشد. اثرات متقابل آب آبیاری و شوری (جدول ۶) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش شوری آب مقدار pH خاک افزایش یافت. تیمار I1S3 بیشترین مقدار pH خاک (۸/۹۸) را داشت که با تیمار I2S3 (۸/۲۶) تفاوت معنی‌دار نداشت. افزایش شوری سبب افزایش املاح خاک و کاهش عمق آب آبیاری از آبشویی املاح جلوگیری می‌کند. املاح در خاک تجمع می‌یابد و بنابراین pH خاک افزایش یافت. محمودآبادی (Mahmoodabadi, 2018) بیان کرد استفاده از آب حاوی سدیم سبب افزایش pH و ESP خاک می‌شود. با افزایش سدیم SAR خاک افزایش یافته و pH زیاد می‌شود.

EC: افزودن ۴ درصد جرمی بیوچار به خاک سبب افزایش ۲/۳۵ برابری شوری خاک نسبت به تیمار شاهد شد. نتایج پژوهش نشان داد (جدول ۳) تیمارهای ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار به‌ترتیب سبب افزایش معنی‌دار درصد قابلیت هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمار شاهد شد. چینتالا و همکاران (Chintala *et al.*, 2013) نیز بیان کردند افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در اثر کاربرد بیوچار به‌دلیل حضور نمک های محلول در بیوچار و زیادتر بودن قابلیت هدایت الکتریکی آن نسبت به قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌باشد. قربانی و امیراحمدی

(Ghorbani & Amir Ahmadi, 2017) در پژوهش خود گزارش کردند اختلاط بیوچار به خاک سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود و دلیل آن را قابلیت بیوچار در جمع‌آوری مواد مغذی خاک به واسطه سطح ویژه زیاد آن بیان کردند. دیوبند هفشجانی و همکاران (Deoband Hafeshjani *et al.*, 2016) نشان دادند که کاربرد بیوچار باگاس نیشکر سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک شد. آنان دلیل آن را حضور نمک‌های محلول در بیوچار و زیادتر بودن قابلیت هدایت الکتریکی آن نسبت به قابلیت هدایت الکتریکی خاک دانستند (Deoband Hafeshjani *et al.*, 2016). افزایش عمق آب آبیاری سبب کاهش شوری خاک شد. تفاوت معنی‌داری از نظر شوری خاک بین تیمارهای ۱۰۰ و ۸۰ درصد عمق آب آبیاری مشاهده نشد. تیمار ۶۰ درصد آب آبیاری نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد آب آبیاری ۵۲/۲۶ درصد شوری خاک را افزایش داد. افزایش شوری آب آبیاری سبب افزایش شوری خاک شد. تیمار ۷ دسی‌زیمنس بر متر شوری آب سبب افزایش ۹۰/۵۱ درصدی شوری خاک نسبت به تیمار ۱ دسی‌زیمنس بر متر شد. اثر متقابل آب آبیاری و بیوچار (جدول ۴) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش مقدار بیوچار مصرفی شوری خاک افزایش یافت. در تمامی سطوح آب آبیاری افزودن بیوچار به خاک سبب افزایش شوری خاک شد. اثر متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد با افزایش شوری آب آبیاری و افزایش بیوچار مصرفی شوری خاک افزایش یافت. تیمار B3S3 با ۲۰/۶۵ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین شوری خاک را داشت که با تیمار B2S3 تفاوت معنی‌دار نداشت. رضایی و همکاران (Rezaei *et al.*, 2017) در پژوهشی بیان کردند افزایش شوری آب آبیاری و کاربرد بیوچار درخاک سبب افزایش غلظت عناصر سدیم، پتاسیم و کلسیم در خاک شده و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک را افزایش دادند. اثر متقابل شوری و مقدار آب آبیاری (جدول ۶) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش شوری آب مقدار شوری خاک افزایش یافت. تیمار I1S3 با ۲۰/۱۴ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین مقدار شوری خاک را داشت که با تیمار I2S3 تفاوت معنی‌دار نداشت.

جرم مخصوص ظاهری و حقیقی: جرم مخصوص ظاهری شاخص مهمی از لحاظ ساختمان خاک، تراکم و کیفیت آن می‌باشد. جرم مخصوص ظاهری بر تعامل گیاه و خاک از قبیل عمق ریشه‌دوانی، انتقال اکسیژن و سایر گازها، نفوذ و دسترسی آب و فعالیت موجودات خاکزی تأثیر می‌گذارد. بیوچار با کاهش جرم مخصوص خاک به پایداری خاکدانه کمک می‌کند (Blanco-Canqui, 2017). بیوچار بعد از افزوده شدن به خاک، بر اثر هوادیدگی و قرار گرفتن در معرض فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، با گذشت زمان به ذرات کوچکتر تبدیل شده و می‌تواند توزیع اندازه ذرات خاک را تغییر دهد (Brodowski *et al.*, 2007). همچنین با افزایش کربن آلی، تخلخل و سطح ویژه خاک و بهبود فعالیت میکروبی خاک، می‌تواند خاکدانه‌سازی را در خاک تحت تأثیر قرار داده و ساختمان خاک را بهبود بخشد (Domene *et al.*, 2009). بیوچار به‌دلیل ساختار متخلخل و سطح ویژه زیاد دارای جرم مخصوص کم بوده و اختلاط آن‌ها با خاک سبب کاهش جرم مخصوص خاک می‌شود (Sohi *et al.*, 2010). مطابق جدول ۳ مقدار بیوچار بر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی تأثیر معنی‌دار داشت. با افزایش مقدار بیوچار مصرفی، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. بیشترین مقادیر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی به‌ترتیب ۱/۷۸ و ۲/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب از تیمار شاهد (بدون مصرف بیوچار) و کمترین مقادیر آن به ترتیب ۱/۳۹ و ۲/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب از تیمار ۴ درصد جرمی مصرف بیوچار به‌دست آمد. کاهش جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک در حضور بیوچار به دو دلیل می‌تواند رخ دهد، یکی به‌دلیل مخلوط شدن خاک با ماده‌ای با چگالی ظاهری کمتر و دیگری ناشی از تأثیر افزایش ماده آلی خاک در اثر کاربرد بیوچار است. ماده آلی سبب بهبود ساختمان خاک، شکل‌گیری خاکدانه‌ها و پایداری آن‌ها می‌شود و از این طریق چگالی ظاهری خاک کاهش می‌یابد (Abel *et al.*, 2013). دوروکس و همکاران (Devereux *et al.*, 2013) نیز براساس نتایج پژوهش خود بیان کردند که افزایش منافذ خاک در اثر مواد آلی موجود در بیوچار، سبب کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود. اختلاف معنی‌دار کاهش چگالی ظاهری با مصرف بیوچار در پژوهش‌های زیادی مشاهده شده است (Hardie *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2014). ابل و همکاران (Abel *et al.*, 2013) در پژوهش خود بیان کردند مصرف بیوچار ذرت باعث کاهش ۸۴ درصدی چگالی ظاهری خاک شد. قربانی و امیراحمدی (Ghorbani & Amir Ahmadi, 2017) در پژوهشی نشان دادند مقدار جرم مخصوص ظاهری در تیمارهای حاوی بیوچار شلتوک برنج چهار درصد کمتر از تیمار شاهد بود. ایشان بیان کردند بیوچار جرم مخصوص کمتری نسبت به مواد معدنی خاک دارد و در اثر اختلاط با خاک سبب کاهش تراکم خاک در واحد حجم می‌شود. بیوچار با تغییر در تراکم دانه‌های خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش می‌دهد (Lim *et al.*, 2016). بوشر و همکاران (Busscher *et al.*, 2011) بیان کردند افزایش کربن آلی خاک با افزودن اصلاح کننده‌های آلی مانند بیوچار سبب کاهش چگالی ظاهری خاک می‌شود و دلیل آن‌را تغییر اندازه خاکدانه عنوان کردند. ایشان معتقد بودند افزودن بیوچار باعث هماوری خاکدانه‌های میکرو شده و در نتیجه وزن مخصوص ظاهری کاهش می‌یابد. مطابق جدول ۳ مقدار آب آبیاری تأثیر معنی داری بر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی نداشت. علی‌رغم این جرم مخصوص ظاهری و حقیقی در تیمار ۱۰۰ درصد مقدار آب آبیاری بیشتر از دیگر تیمارهای آبیاری بود. شوری آب آبیاری سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری و حقیقی شد (جدول ۳). تیمار ۷ دسی‌زیمنس بر متر شوری آب آبیاری سبب افزایش ۱۸/۶۵ و ۱۷/۵۷ درصدی جرم خصوص حقیقی و ظاهری نسبت به تیمار ۱ دسی‌زیمنس بر متر شد. دلیل افزایش

جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک با افزایش شوری را می‌توان افزایش وزن واحد حجم خاک در اثر افزایش و تجمع نمک در خاک در شرایط استفاده از آب شور دانست. اثرات متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (جدول ۵) نشان داد با افزایش بیوچار و کاهش شوری آب آبیاری جرم مخصوص ظاهری و حقیقی کاهش یافت. بیشترین جرم مخصوص ظاهری و حقیقی از تیمار B1S3 و کمترین آن از تیمار B3S1 به‌دست آمد.

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک

Table 3- The results of comparing the average of the measured characteristics of the soil

تیمارهای آزمایشی Experimental treatments		جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gr/cm^3)	جرم مخصوص حقیقی Actual density (gr/cm^3)	اسیدیته pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)	نیتروژن Nitrogen (%)	پتاسیم Potassium (mg/kg)	فسفر Phosphorus (mg/kg)	عملکرد Yield (kg/ha)
بیوچار (٪) Biochar(%)	0	1.78a	2.75a	8.13b	8.96c	0.12b	112.63b	15.47b	967.86b
	2	1.58b	2.38b	9.21a	10.16b	a۲0.2	190.26a	23.95a	1386.45a
	4	1.39c	2.15c	9.26a	21.13a	a۳0.2	200.48a	24.84a	985.27b
مقدار آب آبیاری (درصد) Amount of water irrigation	60	1.42a	2.33a	8.25a	19.52b	0.26a	175.34a	24.86a	959.76b
	80	1.47a	2.33a	8.17a	14.47a	0.24a	168.55a	23.51a	1189.46ab
	100	1.48a	2.36a	7.29ab	12.82a	0.16b	144.78b	20.97b	1350.12a
شوری آب آبیاری (دسی زیمنس بر متر) Salinity of water irrigation	1	1.36bc	2.05bc	7.28ab	10.33c	0.17b	123.37c	17.11c	1219.75a
	4	1.47b	2.23b	8.45a	13.38b	0.21a	163.36b	22.01b	1047.33ab
	7	1.65a	2.52a	8.86a	19.68a	0.23a	201.18a	24.84a	758.63c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل بیوچار و مقدار آب آبیاری (بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table 4- Comparison of the average intraction effects of biochar and the amount of irrigation water (B*I) on the measured characteristics

تیمار Treatment	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	نیتروژن Nitrogen (%)	پتاسیم Potassium (mg/kg)	فسفر Phosphorus (mg/kg)	عملکرد Yield (kg/ha)
B1I1	8.12b	12.53d	0.16c	140.82d	18.34d	621.57d
B2I1	9.18a	16.96b	0.22a	208.56a	23.95a	697.41dc
B3I1	9.36a	21.25a	0.24a	218.13a	24.45a	540.12e
B1I2	8.23b	9.87e	0.17c	136.25d	18.29d	721.82c
B2I2	8.75a	13.14d	0.2ab	193.46b	22.91b	1186.61a
B3I2	8.85a	15.63b	0.21a	200.08ab	23.51ab	784.53c
B1I3	7.68c	8.56ef	0.15cd	128.91e	17.55de	986.27c
B2I3	7.86bc	10.58e	0.19b	159.57c	20.97c	1371.29a
B3I3	8.41ab	14.78c	0.19b	164.32c	21.71c	1002.47b

در جدول I1، I2 و I3 تیمارهای مقدار آب آبیاری برابر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، B1، B2 و B3 تیمارهای مقدار بیوچار برابر ۰، ۲ و ۴ درصد وزنی می‌باشد.

In Table I1, I2, and I3, the amount of irrigation water treatments are equal to 60, 80, and 100% of water requirment, B1, B2, and B3, the amount of biochar treatments are equal to 0, 2, and 4% by weight.

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn, averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل بیوچار و شوری آب آبیاری (بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table 5- Comparison of the average intraction effects of biochar and irrigation water salinity (B*S) on the measured characteristics

تیمار Treatment	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gr/cm^3)	جرم مخصوص حقیقی actual density (gr/cm^3)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	نیتروژن Nitrogen (%)	پتاسیم Potassium (mg/kg)	فسفر Phosphorus (mg/kg)	عملکرد Yield (kg/ha)
B1S1	1.14dc	2.06d	8.11b	8.46e	0.11e	119.63e	16.66f	1057.24b
B2S1	1.13d	2.04d	8.13b	10.52d	0.14d	121.12e	17.75e	1302.53a
B3S1	1.13d	.02d۲	9.11a	11.72cd	0.14d	123.65e	18.11e	804.49c
B1S2	1.42b	2.45b	8.26b	10.63d	0.16c	167.16d	20.08d	817.36c
B2S2	1.19c	2.22c	9.25a	12.25c	0.19b	184.28b	22.61b	754.29d
B3S2	1.15c	2.12c	9.69a	14.85b	0.19b	187.37b	23.21b	624.05e
B1S3	1.66a	2.75a	8.57ab	12.56c	0.17c	176.13c	21.12c	696.85de
B2S3	1.22c	2.25c	9.61a	18.23a	0.23a	211.26a	24.54a	604.28e
B3S3	1.16c	2.15c	9.94a	20.65a	0.24a	216.54a	24.99a	547.81f

در جدول S1، S2 و S3 تیمارهای شوری آب آبیاری برابر ۱، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر، B1، B2 و B3 تیمارهای مقدار بیوچار برابر ۰، ۲ و ۴ درصد وزنی می‌باشد.

In Table S1, S2, and S3, the irrigation water salinity treatments are equal to 1, 4, 7 dS/m, B1, B2, and B3, the amount of biochar treatments are equal to 0, 2, and 4% by weight.

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn, averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ٦- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و شوری آب آبیاری) بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک

Table 6- Comparison of the average intraction effects of irrigation water amount and irrigation water salinity (I*S) on measured soil properties

تیمار Treatment	جرم مخصوص ظاهری Bulk density (gr/cm^3)	جرم مخصوص حقیقی actual density (gr/cm^3)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	نیتروژن Nitrogen (%)	پتاسیم Potassium (mg/kg)	فسفر Phosphorus (mg/kg)	عملکرد Yield (kg/ha)
I1S1	1.44cd	1.19cd	6.23b	10.75c	0.18c	152.82d	20.23c	1085.25b
I2S1	1.38d	1.16d	6.14b	10.63c	0.17cd	143.63d	18.44d	1326.85a
I3S1	1.32d	1.13d	6.06b	9.56cd	0.16c	138.18d	17.92d	1334.57a
I1S2	1.62b	2.38b	7.31ab	15.74b	0.23ab	176.57b	23.21ab	1014.52bc
I2S2	1.56bc	2.33bc	7.22ab	14.36b	0.22b	169.42bc	22.01b	1027.39b
I3S2	1.51c	2.28c	6.45b	11.58c	0.19c	158.52c	20.52c	1258.69ab
I1S3	1.75a	2.48a	8.98a	20.14a	0.27a	202.21a	24.69a	724.56c
I2S3	1.71a	2.41a	8.26a	18.24a	0.25a	186.46a	23.65a	876.47c
I3S3	1.48c	2.24c	7.12ab	14.28b	0.19c	164.78c	20.97bc	915.68c

در جدول S1، S2 و S3 تیمارهای شوری آب آبیاری برابر ۱، ۴ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر، I1، I2 و I3 تیمارهای مقدار آب آبیاری برابر ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد وزنی می‌باشد.

In Table S1, S2, and S3, the irrigation water salinity treatments are equal to 1, 4, 7 dS/m, I1, I2, and I3, the amount of irrigation water treatments are equal to 60, 80, and 100% of water requirement.

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ ٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

اختلاط بیوچار با خاک در شرایط استفاده از آب شور، سبب شور شدن بیشتر خاک و تجمع نمک در خاک شده و جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک افزایش می‌یابد. اثر متقابل آب آبیاری و شوری (جدول ۶) نشان داد در هر کدام از تیمارهای آب آبیاری افزایش شوری آب آبیاری سبب افزایش جرم مخصوص ظاهری و حقیقی شد. با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش شوری آب، شدت تنش وارده به خاک بیشتر و پراکندگی ذرات بیشتر شد، بنابراین جرم مخصوص ظاهری و حقیقی افزایش یافت.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی اثرات بیوچار در شرایط تنش آبی و شوری آب آبیاری بر عملکرد کینوا و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد افزودن بیوچار به خاک سبب افزایش مقدار عملکرد گیاه کینوا، pH و EC خاک شد. جرم مخصوص حقیقی خاک با افزودن ۲ و ۴ درصد جرمی بیوچار به خاک به‌ترتیب ۱۳ و ۲۱ درصد و جرم مخصوص ظاهری به‌ترتیب ۱۱ و ۲۲ درصد کاهش یافت. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیق، کاربرد بیوچار به‌عنـوان روشـی مناسب برای بهبود کیفیت شـیمیایی و حاصـلخیزی خـاک

هـای فقیر و سبک توصیه می‌شود. با کاربرد بیوچار مقدار عناصر غذایی خاک (فسفر، نیتروژن و پتاسیم) افزایش یافت. این افزایش نشان‌دهنده پتانسیل این اصلاح‌کننده در برطرف نمودن کمبود این عناصر در شرایط خشکی در خاک می‌باشد. با توجه به این‌که ماندگاری بیوچار در خاک به مراتب بیشتر از ماده اولیه آن گزارش شده است، می‌توان از بیوچار به‌عنوان پتانسیلی برای ارتقاء پایدار سطح حاصل‌خیزی خاک، کاهش مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی و کاهش خطرات زیست‌محیطی آن‌ها استفاده کرد. با توجه به اثرات متفاوتی که بیوچار بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و زیستی خاک در مناطق مختلـف دارد، پیشنهاد می‌شود تأثیر آن بر ویژگی‌های خاک‌های مختلف با بیوچارهای متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به این‌که افزودن این ماده آلی به خاک در سطوح زیاد سبب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود لذا استفاده از مقادیر زیاد بیوچار در خاک باید با احتیاط انجام شود.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشـگاه زابل انجام شـده اسـت. کد پژوهانه IR-UOZ-GR-1837

References

1. Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., & Wessolek, G. (2013). Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*, 202–203:183–191. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003
2. Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, G., & Pourbabaee, A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant Soil and Environment*, *61*, 475-482. (In Persian with English abstract)
3. Agegnehu, G., Bass, A.M., Nelson, P.N., & Bird, M.I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality: maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, *543*, 295-306. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054
4. Akhtar, S.S., Andersen, M.N., & Liu, F. (2015). Biochar mitigates salinity stress in potato. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *5*, 368- 378. https://doi.org/10.1111/jac.12132
5. Algosaibi, A.M., El-Garawany, M.M., Badran, A.E., & Almadini, A.M. (2015). Effect of irrigation water salinity on the growth of Quinoa plant seedlings. *Journal of Agricultural Science*, *7*(8), 205. https://doi.org/10.5539/jas.v7n8p205
6. Bhupindar, S.S. (2014). Nanothechnology in agri- food production: an overview. Nanotechnology science and applications. India. www.Dovepress. 7:31-53.
7. Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal*, *81*(4), 687-711. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017
8. Bremner, J.M. (1996). Nitrogen total. In: *Methods of Soil Analysis*. D. L. Sparks et al. (eds) part III, 3rd ed. Am. Soc. Agron. Inc., Madison, WI. Pp. 1085-1122.
9. Brodowski, S., Amelung, W., Haumaier, L., & Zech, W. (2007). Black carbon contribution to stable humus in German arable soils. *Geoderma*, *139*, 220–228. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.02.004
10. Busscher, W., Novak, J.M., & Ahmedna, M. (2011). Physical effects of organic matter amendment of a southeastern US coastal loamy sand. *Soil Science Society of American Journal*, *176*, 661-667. https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3182357ca9
11. Cheng, C.H., Lehmann, J., Thies, J.E., & Burton, S.D. (2008). Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 113, 10.
12. Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T.E., Papiernik, S.K., Malo, D.D., Clay, D.E., Kumar, S., & Gulbrandson, D.W. (2013). Nitrate sorption and desorption in biochars from fast pyrolysis. *Microporous and Mesoporous Materials*, *179*, 250-257.
13. Chintala, R., Mollinedo, J., Schumacher, T.E., Malo, D.D., & Julson, J.L. (2014). Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *60*, 393-404.
14. Dabhi, R., Bhatt, N., & Pandit, B. (2013). Super absorbent polymersan innovative water saving technique for optimizing crop yield. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, *10*, 5333-5340.
15. Deoband Hafeshjani, L., Naseri, A., Houshmand, A., Abbasi, F., & Soltani Mohammadi, A. (2016). Investigating the effect of sugarcane bagasse biochar on the chemical properties of a sandy loam soil. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, *40*, 72-63. (In Persian with English abstract)
16. Devereux, R.C., Sturrock, C.J., & Mooney, S.J. (2013). The effects of biochar on soil physical properties and winter wheat growth. *Journal of Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, *103*(1), 13-18.
17. Domene, X., Mattana, S., Hanley, K., Enders, A., & Lehmann, J. (2014). Medium -term effects of corn biochar

addition on soil biota activities and functions in a temperate soil cropped to corn. *Soil Biology and Biochemistry*, *72*, 152-162.

18. Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P. (2009). *Physical properties of biochar*. pp. 13- 32. In Lehmann J. and S. Joseph (Eds). Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan: London, UK.
19. Elewa, T.A., Sadak, M.S., & Saad, A.M. (2017). Proline treatment improves physiological responses in quinoa plants under drought stress. *Bioscience Research*, *14*(1), 21-33.
20. Fathi Gerdelidani, A., & Mirseyed, H. (2015). *Different aspects of biocurrent effects in improving soil quality*. International Conference on Applied Research in Agriculture, Tehran, 22 May: 1-12. (In Persian with English abstract)
21. Forohar, M., Khorasani, R., Fototvat, A., Shariat-Madari, H., & Khavazi, K. (2017). The effect of different biochars and their raw materials on some soil chemical properties and nutrients over time in a calcareous soil. *Water and Soil Journal*, *32*(2), 299-312. (In Persian with English abstract)
22. Ghorbani, M., & Amir Ahmadi, A. (2017). The effect of rice husk biochar on some soil physical properties and corn growth in a loamy soil. *Journal of Soil Research*, *32*(3), 306-319. (In Persian with English abstract)
23. Gopal, M., Gupta, A., Hameed, K.S., Sathyaseelan, N., Rajeela, T.K., & Thomas, G.V. (2020). Biochars produced from coconut palm biomass residues can aid regenerative agriculture by improving soil properties and plant yield in humid tropics. *Biochar*, *2*, 211-226. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00043-5
24. Guvili, A., Mousavi, A.A., & Kamkar Haghighi, A. (2016). Effect of cattle manure biochar and moisture stress on growth characteristics and spinach water use efficiency in greenhouse conditions. *Water Research in Agriculture*, *30*(2), 259-243. (In Persian with English abstract)
25. Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil*, *376*, 347–361. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x
26. Hasanpour, E., Shirvani, M., Haj Abbasi, M.A., & Majidi, M.M. (2022). Acidic biochars on some chemical characteristics and ability to absorb nutrients of calcareous soils. *Journal of Water and Soil Sciences*, *26*(2), 39-59. (In Persian with English abstract)
27. HE, L.L., Zhong, Z.K., & Yang, H.M. (2017). Effects on soil quality of biochar and straw amendment in conjunction with chemical fertilizers. *Journal of Integrative Agriculture*, *16*(3), 704-712. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61420-X
28. Hirich, A., Choukr, R., & Jacobsen, S. (2013). The combined effect of deficit irrigation by treated wastewater and organic amendment on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) productivity. *Journal Desalination and Water Treatment*, *25*, 2208-2213.
29. Hosseini, M., Movahedi Naeini, S.A., & Bameri, A. (2015). The effect of different tillage methods on the amount of available potassium in soils with different extractants in a soil with high specific surface area. *Water and Soil, 4*, 966-979. (In Persian with English abstract)
30. Ibrahim, O.M., Bakry, A.B., El Kramany, M.F., & Elewa, T.A. (2015). Evaluating the role of biochar application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions. *Global Journal of Advanced Research*, *2*(2), 411-418.
31. Kang, J., Hesterberg, D., & Osmond, D.L. (2008). Soil organic matter effects on phosphorus sorption: A path analysis. *Soil Science Society of America Journal*, *73*, 360-366
32. Karmaka, S., Lague, C., Agnew, J., & Landry, H. (2007). Integrated decision support system (DSS) for manure management. *Computers and Electronics*, *57*, 190-201. https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0113
33. Knowles, O., Robinson, B., Contangelo, A., & Clucas, L.(2011). Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Science of the Total Environment*, *409*, 3206 -3210.
34. Kumar, S., Masto, RE., Ram, LC., Sarkar, P., George, J., & Selvi, VA. (2013). Biochar preparation from Parthenium hysterophorus and its potential use in soil application. *Ecological Engineering*, 55, 67–72. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.011
35. Laird, D.A., Fleming, P.D., Karlen, D.L., Wang, B., & Horton, R. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, *158*, 436–442. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012
36. Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management- an introduction*. In: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). Biochar for environmental management: Science and Technology. Earthscan, London, pp. 1–11.
37. Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Theis, J., Luizao, F.J., Peterson, J., & Neves, E.G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, *70*, 1719–1730. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007
38. Lim, T., Spokas, K., Feyereisen, G., & Novak, J. (2016). Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere*, *142*, 136-144. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069
39. Luo, C., Deng, Y., Inubushi, K., Liang, J., Zhu, S., Wei, Z., Guo, X., & Luo, X., (2018). Sludge biochar amendment and alfalfa revegetation improve soil physicochemical properties and increase diversity of soil microbes in soils from a rare earth element mining wasteland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(5). https://doi.org/10.3390/ijerph15050965

40. Mahmoodabadi, M. (2018). Investigating the effect of sequential application of organic matter and irrigation with sodium water on the size distribution of secondary soil particles. *Environmental Erosion Research*, *15*, 24. (In Persian with English abstract)
41. Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, *333*, 117–128. (In Persian with English abstract)
42. Mensah, A.K., & Frimpong, K.A. (2018). Biochar and/or compost applications improve soil properties, growth, and yield of maize grown in acidic rainforest and coastal savannah soils in Ghana. *International Journal of Agronomy*, *7*, 1-8.
43. Mir, A., Piri, H., & Naserin, A. (2021). The effects of different levels of wheat biochar and water stress on the quantitative and qualitative characteristics of Carla (bitter melon) in pots. *Water Research in Agriculture, 35*(2), 170-185. (In Persian with English abstract)
44. Mokami, A., Yazdan-Panah, N., & Saidenjad, A.H. (2022). The effect of using vermicompost and biochar on the morpho-physiological characteristics of quinoa under drought stress conditions. *Iran Water and Soil Research*, *53*(1), 130-140. (In Persian with English abstract)
45. Mukherjee, A., & Zimmerman, A.R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory produced biochars and biochar-soil mixtures. *Geoderma*, *194*, 122-30. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.002
46. Najafi Ghairi, M. (2014). The effect of using different biochars on some soil characteristics and the ability to absorb some nutrients in a calcareous soil. *Journal of Soil Research*, *29*(3), 351-358. (In Persian with English abstract)
47. Najafi Ghiri, M., Abtahi, A., Owliaie, H.R., Hashemi, S.S., & Koohkan, H. (2011). Factors affecting potassium pools distribution in highly calcareous soils of southern Iran. *Arid land Research and Management*, *25*, 313-327. (In Persian with English abstract)
48. Najafi Ghiri, M., Bostani, H., & Mahmoudi, A. (2017). The effect of the remains of three plant species and their biochar on some characteristics and potassium status of a calcareous soil. *Soil and Water Science Research Journal*, *32*(1), 25-36. (In Persian with English abstract)
49. Negaresh, H., & Latifi, L. (2018). The origin of wind deposits in the east of Zabol through morphoscopy and physical and chemical analysis of sediments. *Geography and Environmental Planning*, *20*(1), 1-22. (In Persian with English abstract)
50. Nelissen, V., Rütting, T., Huygens, D., Staelens, J., Ruysschaert, G., & Boeckx, P. (2012). Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *55*, 20-27. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.05.019
51. Netondo, G.F., Onyango, J.C., & Beck, E. (2004). Sorghum and salinity: II. Gasexchange and chlorophyll fluorescence of sorghum under salt stress. *Crop Science*, *44*, 806–811. https://doi.org/10.2135/cropsci2004.7970
52. Olsen, S.R., and Sommers, L.E. (1990). Phosphorus. P 403-431. In: A.L. Page (ed), *Method of soil analysis*. Part 2. 2nd agron Monoger., ASA, Madison, WI.
53. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy. *In Soil Science Society of America*, 1159.
54. Piri, H., Naserin, A., & Albalasmeh, A. (2022). Interactive effects of deficit irrigation and vermicompost on yield, quality, and irrigation water use efficiency of greenhouse cucumber. *Journal of Arid Land*, *14*(11), 1274-1292. https://doi.org/10.1007/s40333-022-0035-7
55. Rahimi-Alashti, S., Bahmanyar, M.A., Qajarspanlou, M., Sadegh-Zadeh, F., & Khodsi-Bidgoli, A. (2021). The effect of the use of some organic and inorganic amendments on the amount of high-use and low-use elements of the soil under quinoa cultivation under water stress conditions. *Soil Management and Sustainable Production*, *11*(2), 25-48. (In Persian with English abstract)
56. Rajabi, H. (2014). *Effect of pistachio residue, sewage black mud, and chemical fertilizer on bio- provision and nitrogen and phosphorus absorption by spinach*. Master Thesis. Shiraz University.
57. Rezaei, N., Rezaghi, F., Sepaskhah, A., & Mousavi, A. (2017). The effect of biochar and irrigation water salinity on chemical properties of soil under bean cultivation. *Journal of Soil and Water Science Research*, *32*(1), 13-24. (In Persian with English abstract)
58. Robbiani, Z. (2013). Hydrothermal carbonization of biowaste/fecal sludge. *Lappeenranta University of Technology*, *41*, 1-71.
59. Shirmardi, M., & Tofighi, H. (2014). Effect of organic matter on phosphorus stabilization kinetics in several different soils. *Iranian Soil and Water Research*, *46*, 567-577. (In Persian with English abstract)
60. Singh, B.P., Hatton, B.J., Singh, B., Cowie, A.L., & Kathuria, A. (2010). Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality*, *39*(4), 1224–1235.
61. Sohi, S., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, *105*, 47-82. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9
62. Sun, H., Shi, W., Zhou, M., Ma, X., & Zhang, H. (2019). Effect of biochar on nitrogen use efficiency, grain yield and amino acid content of wheat cultivated on saline soil. *Plant, Soil and Environment*, *65*, 83-89.
63. Telahigue, D.C., Yahia, L.B., Aljane, F., Belhouchett, K., & Toumi, L. (2017). Grain yield, biomass productivity

and water use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. *Journal of Scientific Agriculture*, *1*, 222-232. (In Persian with English abstract)

64. Thaghafi, F., Qanei-Bafghi, M.J., & Shirmardi, M. (2021). The effect of palm tree waste biochar on element concentration, sodium absorption ratio and some physical properties of saline soil. *Desert Ecosystem Engineering*, *10*(31), 85-94. (In Persian with English abstract)
65. Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, *327*, 235-246. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x
66. Walkey, A., & Black, I.A.(1934). An examination of the Degtjareeff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, *37*, 29-38.
67. Wang, L., Xue, C., Nie, X., Liu, Y., & Chen, F. (2018). Effects of biochar application on soil potassium dynamics and crop uptake. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *181*, 635-643. https://doi.org/10.1002/jpln.201700528
68. Waraich, E.A., Ahmad, R.M., Saifullah, Y., & Ashraf, E. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, *6*, 764-777.
69. Westeman, R.E.L. (1990). *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, Wisconsin, USA. 784p.
70. Yao, F.X., Arbestain, M.C., Virgel, S.F., Blanco, Arostegui, J.J., Macia-Agullo, A., & Macias, F. (2009). Simulated geochemical weathering of a mineral ash-rich biochar in amodified Soxhlet reactor. *Chemosphere*, *80*, 724–732. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.026
71. Yuan, J.H., Xu, R.K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, *102*(3), 3488-3497. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018
72. Zahoor, R., Dong, H., Abid, M., Zhao, W., Wang, Y., & Zhou, Z. (2017). Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism. *Environmental and Experimental Botany*, *137*, 73-83. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.02.002
73. Zhang, M., Fan, C.H., Li, Q.L., Li, B., Zhu, Y.Y., & Xiong, Z.Q. (2015). A 2-yr field assessment of the effects of chemical and biological nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency in an intensively managed vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *201*, 43-50. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.12.003
74. Zhang, M., Riaz, M., Liu, B., Xia, H., El-Desouki, Z., & Jiang, C. (2020). Two-year study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity. *Science of the Total Environment*, *717*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137286
75. Zolfi Bavariani, M., Ronaghi, A., Karimian, N., Ghasemi, W., & Yatharbi, J. (2015). The effect of biochar prepared from chicken manure at different temperatures on the chemical characteristics of a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Sciences*, *20*(75), 73-84. (In Persian with English abstract)